בראונית

27 בדצמבר 2020

1 51% תאור הרקע ומטרת הניסוי

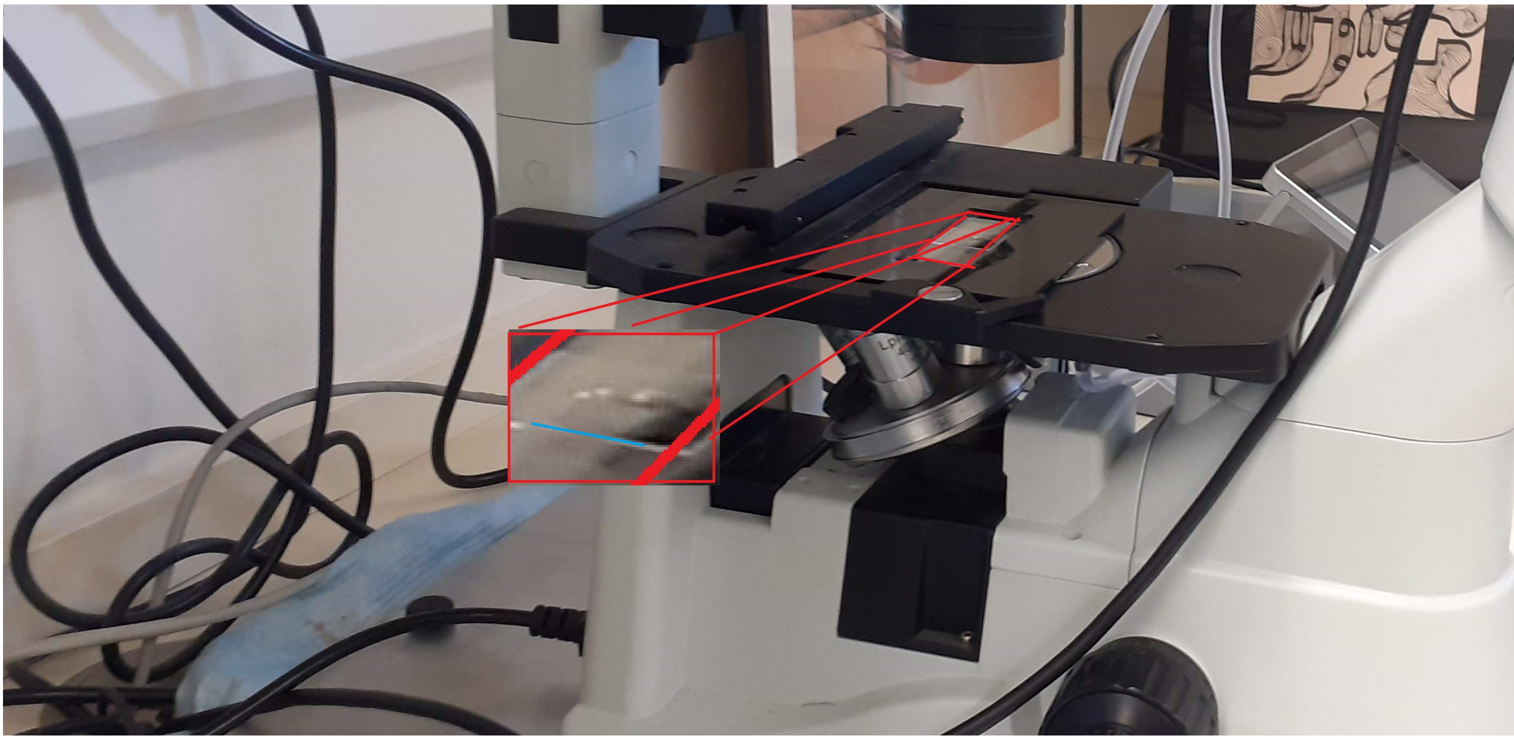
הניסוי בוחן תנועה רב חלקיקית, תחת הנחת הארגודיות - לפיה הכוח מתפלג באופן אחיד על כלל המערכת-. ולכן מיצוע שלו יניב $\langle xF(t) \rangle = 0$. פיתוח מהכיוון הנ"ל יביא למשוואת התנועה הבאה :

$$\langle x^2 \rangle = \frac{m}{\alpha} e^{-\frac{\alpha}{m}t} x_0^2 + \frac{2k_BT}{\alpha}t$$

נזכיר כי ל α היה יחידות של $\left[\frac{m}{t}\right]$ (קבוע משוואת סטוקס), אנו מצפים כי למדידה לאחר זמן סביר תזניח את האיבר המעריכי ונקבל את :

$$\frac{2k_BT}{6\pi\mu a}t = \frac{2k_BT}{\alpha}t = \langle r^2 \rangle$$

. מה שמתאים לפיתוח דרך משוואת הדיפוזיה - $\frac{\partial}{\partial t}\psi = D\nabla^2\psi$, כאשר ψ היא צפיפות החומר, הפתרון הוא : $\psi(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{4Dt}}}{\sqrt{4\pi Dt}}$ כלומר התפלגות נורמלית ולכן $\mathbb{V}[x] = \mathbb{E}[x^2] = \sqrt{2}Dt$ (**לבדוק שאכן פקטור** $\sqrt{2}$**)**. מטרתנו בניסו הייתה תחילה לאשש תאוריה זאת, כלומר לבדוק האם ההנחת הרגודיות היא סבירה בתנאים של טמפ' החדר וריכוזים שונים של טווחים אותם אנו מעריכים כ"סטנדרטים". לאחר הערכה הגסה, לתת תוקף נוסף בהמצאות חישוב קבוע בולצמן עד כדי שגיאה שמקורה ביכולת המדידה. לשמחתנו אף על פי שהתרשלנו במדידת הטמפ' ונוכחות של זרם, הגענו להערכה טובה של קבוע זה עד **להשלים .... ספרות אחרי הנקודה**. **בטווח ...**



איור 1 : המיקרוסקופ בו השתמשנו כדי לקחת את הדגימות, בהגדלה ניתן לראות את הצלחית ששימשה אותנו, הפס הכחול מדגיש את הזכוכית העליונה שנועדה לשטח את הרכיוז.

2 53% תאור מהלך הניסוי איך הניסוי בוצע - שיטת העבודה בעיות מיוחדות – איך התגברתם

2.0.1 תיאור טכני של מהלך הניסוי.

כדי לבחון את התנועה הבראונית חילקנו את הניסוי לפי ריכוזים שונים. כל ריכוז הכיל כ 10% ריכוז של חלקיקים -להלן טבלה-, וכ 90% מתערובת של מים וגליצרול. יחד בנפח כולל של כ $40_{[\mu L]}$. להלן טבלה המתארת את את ריכוז הגליצרול בתערובת בכל אחד הניסויים, ולכל ריכוז שכזה את קבוע הצמיגות המאפיין אותה. כל ריכוז שוכן בין שתי פלטות זכוכית, במטרה לצמצם את דרגת החופש של התנועה בציר ה $\hat{z}$. ובכך להבטיח שאנו מסתכלים על מערכת שהיא בקרוב דו מימדית.

עוד קצת פרטים טכנים על הכנת הריכוזים. כדי להבטיח יחס של 90 ל 10 %, בתמיסה הכוללת דגמנו כ$160_{[\mu L]}$ מריכוז תערובת הגליצרול וכ $40_{[\mu L]}$ מתערובת החלקיקים, שמנו לב כי עבור ריכוזים גבוהים של גליצרול, הפטיפטה מזייפת, בערכה גסה כ ..., כלומר היא אינה יונקת כ $160_{[\mu L]}$ נפח.

את תמונה המתקבלת מהמיקרוסקופ ניתחנו בהמצאות תוכנת מעקב, עבור חלקיקים שנבחרו באופן סלקטיבי כך שלמראית העין ניראים כדורים. כארבעה חלקיקים פר ריכוז. במערכת המצייתת באופן מושלם להנחת הארגודיות, מקטע הנתונים $[t_1 \to t_2]$ הוא מדידה בפני עצמו. זאת מאחר ומערכת ארגודית היא חסרת זכרון. הסעיף הבא מתואר כיצד השתמשנו בעובדה הזאת, כדי להתגבר על משברים שנקלנו בם בעת ההסקה מהמדידה. לצורך המשך הדיון נגיד כי חלון ω הוא אינטרוול זמן, ומיצוע על החלונות פירושה

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{\#windows} \sum_{\omega} X[\omega + t]$$

כאשר X הוא גודל כל שהוא (כמובן שבהקשר המרחק $X = \bar{x}^2$). שוב, בהתאמה מושלמת לתאוריה, המדידה על פני החלונות שקולה למדידה על פני חליקיקים שונים ברדיוס זהה.

נציין כי בתחילת הניסוי ההיינו חשדנים לגבי טיב האיכות של התוצאות המתקבלות מבחירה סלקטיבית של חלקיקים (כדורים). ולמעשה הדרישה הזאת אינה הכרחית אם מניחים כי התפלגות צורת החלקיקים היא ללא עדיפות מבחינה מרחבית, כלומר שבתוחלת הכדורים שואפים להיות כדורים. המחשבה הזאת, התניעה בנו מוטיבציה לסכום על פני כל החלקיקים במערכת, ומשם קבוע בולצמן יהיה השיפוע של הישר התקבל מחישוב התוחלת המותנת

$$k_B t = c \cdot \mathbb{E}\left[\mathbb{E}\left[r^2|a\right]\right](t)$$

. תוצאה שכזאת הייתה יכולה להיות מאוד מרגשת. לבסוף לא הצלחנו לממש את הרעיון אך יצאו לנו כמה תמונות יפות ,ויותר חשוב, ההתעסקות בכך חיזקה את הבנה הכללית שלנו לגבי קנה המידה של המערכת, עד כמה היא רועשת, מה זה אומר ארגודיות בעצם ולמה כשאומרים "סביר להניח" אז באמת סביר להניח.

2.0.2 סחף.

נזכיר שוב כי פיתוח הקשר של התנועה הבראונית מניח כי מיצוע על פני הכוח אותו ירגיש חליקיק במרחב מתאפס $\langle xF(x,t)\rangle$. אך ברור כי גורמים שונים יכולים להטוות כיוון לכוח זה ומכאן כיוון מרכזי לזרימה על הצלוחית. בהינתן כיוון מועדף נצפה כי $\langle x(t)\rangle \neq 0$ (תוחלת מיקום החלקיק).

הגישה הראשונה בה נקטו כדי להתמודד עם הפער בין ההנחות למצב המערכת היתה צימצום למינמום השפעות החיצוניות על המערכת. השתמשנו בפלס כדי לוודא שמשטח המיקרסקופ ישר ובכך נמנע מכוח הגרויטציה של כדו"א להאיץ את החליקיקים, דאגנו לחכות לחכות זמן סביר כדי שתנאי ההתחלה שנירכשו ברגע הצבת הצלוחית ידעכו. נוסף על כל זה הקפדנו על סטראיליות מאחר וראינו כי הצטברות אבק עקב הזנחה של צלוחית עשויה גם לתת תוצאות מוזרות.

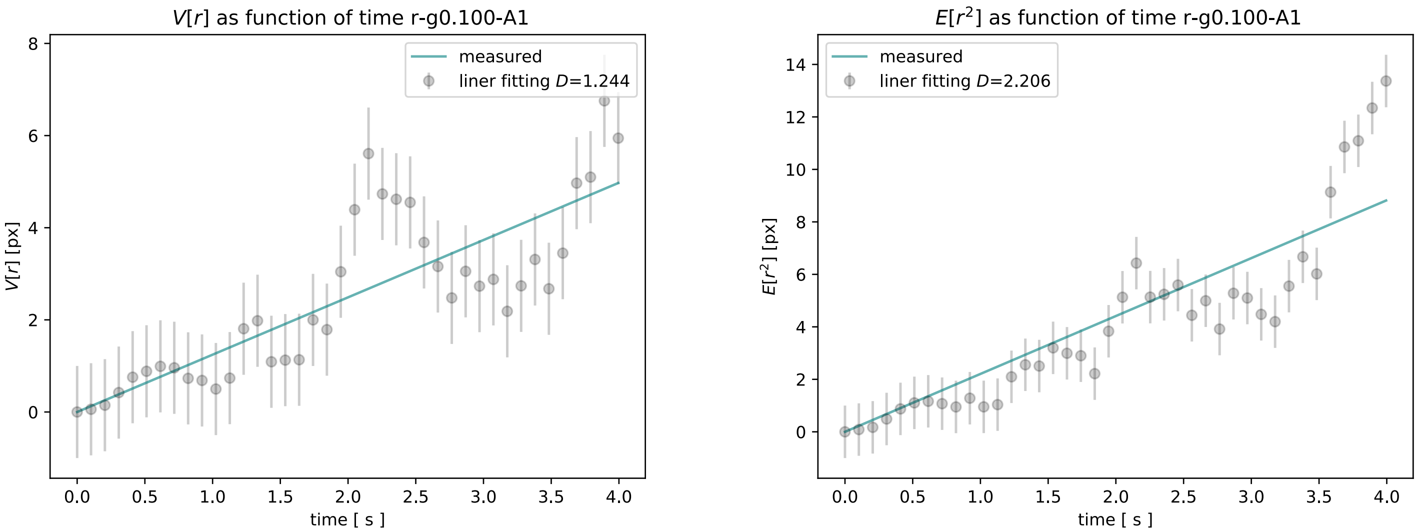
לאחר שיצמצמנו את עוצמת השפעת ההפרעות, נקטנו בגשיה שניה - כעת היה ניתן להניח כי ההפרעות בטווח קצר (טווח שהתברר בדיעבד בסדר גודל של שניות, כלומר אכן מתאים לזמן האופייני בניסוי) הן אינן הגורם העיקרי בהכתבת אופי התנועה ומעתה היה ניתן לחשוב עלייהם כאל 'משתנה מקרי', ועל מקטע זמן כאל דגימה, חילקנו הנתונים אל חלונות.

זה עדיין, לא הספיק. להל"נ (איור 2) ניתוח על פני $60 \sim$ פריימים (6 שניות לחלון) לחלקיק הנמצא בתווך עם מקדם צמיגות $10^{-4}\,[P \cdot s]$. של מיצוע על פני החלונות. וההתאמה הלניארית המתאימה לו. מאחר והסקלה קטנה קל להתבלבל וחשוב שקיבלנו גרף לניארי, אבל למעשה בזמן של 6 שניות קיבלנו שיפוע של $3.5 \sim$, כלומר בערך הכפלה לאחר 4 שניות. הגדלים הללו אינם דומים כלל לזמן האופייני במערכת.

מצד שני הקורא המתעמק ישים לב שהפונקציה המתקבלת היא כמעט אינה רועשת, כלומר זה ניראה שבחלון קטן, המומוצע הארמטי של $x^2(t)$ נישלט לפי כלל מסויים במערכת. וזה הביא אותנו לגישה השלישית.

את הגישה השלישית, אנחנו חייבים למדריכה (שני), למעשה. פיתוח משוואה הדיפוזיה חוזה כי המקדם אותו אנו מחפשים $\frac{2k_BT}{\alpha}$ הוא שונות התפלגות המתקבלת ממשוואת הדיפוזיה. תחת ההפרעות, נקבל כי הממצוע של ההתפלגות כבר אינו מתאפס. ומכאן שגם

$$\mathbb{E}[r] \neq 0 \Rightarrow \mathbb{V}[x] \mapsto \mathbb{E}\left[r^2\right] - \mathbb{E}^2[r]$$



איור 2: $\mathbb{E}\left[r^2\right]$ ו- $\mathbb{V}\left[r^2\right]$ ניתוח על פני 4 שניות לחלון. לחלקיק הנמצא בריכוז 0.1% גליצרול (מקדם צמיגות $10^{-4}\left[P\cdot s\right]$)
הערה חשובה, אומנם זה ניראה שהאתאמה הלניארית היא פחות טובה עבור השונות. אבל יש לשים לב שהסקלה של ציר ה $\hat{y}$ בתרשים הקודם היא כפולה. ולכן גם המרחקים מהציר הם משמעותים יותר. והשיפוע תלול בהרבה.

3

3.0.1 תיאור טכני של אלגוריתם, שגיאות. מספרים. (מצבו הסופי)

3.0.2 עניין הסחף, לדעתי אפשר לשים פה גם עניין של רזוננס. פתירת משוואת הדיפוסיה תחת תנאי התפסות על השפה, צריכים לתת תיקון כי לא יתכן שזה ישאף להיות כמו e^{-t} אלה צריך להתייצב על משהו (לחומר אין לאן לברוח). הפתרון הוא כמובן חקר המערכת רק בסדר ראשון (חלוקה לבאנצ'ים).

3.0.3 עניין הרעש, בדגימה. (שימוש בפילטרים וכל העניין).

3.0.4 עניין השידוכים לדבר תחילה על שימוש ב DFS ו דגימה פר פריים, ואז על המעבר אל BFS ושמוש במרכזי המסה שמצאנו כנקודות מוצא לחיפוש.

3.0.5 התייחסות לכך שהמסות והנפחים אינם בהכרח כדורים, ולכן אנו מצפים לקבל עבור המסה והרדיוס המוצעים.

4 05% פרוש התוצאות הצגת התוצאות + חישוב שגיאות מקור השגיאות – איך הערכתם אותן – מה מקורן – איך התגברתם השוואת התוצאות לתאוריה

generateTable

.הכרות המערכת ומדידה ראשונית: השתמשו במיקרוסקופ לקבלת תמונה איכותית של חלקיק הנמצא בתנועה בראונית בתמיסה.

בצעו כיול של הגודל הנראה של החלקיק באמצעות שקף כיול.

כיצד תנתחו את ממוצע ריבוע ההעתק? כמה חלקיקים שונים נדרשים לקבלת תוצאה איכותית? התייחסו להנחה הארגודית.

האם החלקיקים חופשיים לנוע בציר (Z בניצב ללוחית המיקרוסקופ)? כיצד זה ישפיע על המדידה?

כיצד תוודאו שהמערכת איזוטרופית, כלומר שאין סחיפה לכיוון מסוים? מה ניתן 2 לעשות בניתוח הנתונים כדי להתמודד עם סחף?

איך תראה התלות של < >r בזמן במקרה של סחיפה? קבלו את התלות של < >r 2 בזמן עבור מספר חלקיקים בגדלים שונים.

בדקו את התלות בגודל ביחס לצפוי תיאורטית.

2 .תלות בצמיגות: הוסיפו תמיסת חלקיקים מרוכזת לתערובת של מים וגליצרול בריכוזים שונים.

קחו בחשבון את המים שבתמיסת החלקיקים וחשבו מחדש את הריכוז בתמיסה 2 הסופית. השתמשו בטבלאות לחישוב הצמיגות וקבלו תלות של < >r ושל מקדם הדיפוזיה בצמיגות.

כיצד ניתן להשתמש במדידה זו לחישוב קבוע בולצמן?

3 .תלות בטמפרטורה: שנו את הטמפ' וחזרו על המדידות בערכי טמפ' שונים. קחו בחשבון את שינוי הצמיגות כתוצאה משינוי הטמפ' (ניתן למצוא מחשבונים וטבלאות לחישוב הבדל זה, שהוא משמעותי).

4 .דיפוזיה של חזית (אופציונאלי): השתמשו בנוזלים שונים מסיסים במים (חלב, צבע מאכל, דיו) וצפו בחזית התקדמות הנוזל לתוך המים. האם יש לכם אומדן לגודל החלקיקים? האם כל דיפוזיה היא תנועה בראונית?

5 שיחת סיכום -10 נקודות על אי-קיומה

6 נספחים: